

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

问题  
讨论

# 从丽江 7.0 级地震前的地壳形变探讨 地震短临前兆特征

周友华 童迎世 肖海

(湖南省地震局,长沙,410001)

**内容提要** 本文讨论了“拉疏隆起-压缩凹陷”——不稳孕震体特性和形成机理;通过对丽江 7.0 级地震前滇西地区的地壳形变资料,进一步证实本区有强震发生及发震的地点;讨论了孕震体由“僵硬闭锁”到“不同步加速”、“分离反向”、“不均匀掀斜”、再度“停滞平静”、甚至“颤抖”等多态不稳变化,是地壳形变的短临地震前兆特征;根据震前“拉疏隆起-压缩凹陷”的范围大小、幅度值及岩层的弹性应变,可近似计算震级的大小。

**关键词** 拉疏隆起 压缩凹陷 僵硬闭锁 加速反向 临震预报 滇西地区

笔者曾提出了地震孕育发生的关键因素是地壳岩层弹性垂直差异运动的速率大小<sup>[1,2]</sup>,及地震孕育发生基本的物理机制是由于地壳岩层弹性垂直差异运动的不均衡及地壳块体结构的整体性,使块体形成“拉疏隆起-压缩凹陷”不稳定状态的孕震体<sup>[2,3]</sup>。

如图 1 所示,由于在大陆差异上升的地区,地势相对高的 D 区的上升速率总是要大于与之相连的地势较低的 C 区的上升速率(否则就不是差异上升区)。如果 C、D 地区岩层结构整体性较好,则上升快的 D 区的地壳岩层就会“拉着”上升慢的 C 区的岩层一起运动。这样就使得 C 区相对于它的左右两侧及下方地区,上升的速率就加快了。因而使得 C 区的上升运动就会“超前”了,形成一个拉疏隆起的“鼓包”;但是由于相连的 C、D 地区的整体性比较好,反过来 C 区又会“拖着”D 区,使 D 区的上升速率减慢,因而又会使得 D 区相对它的左右两侧及上方地区,它的上升运动就会“迟后”了。由于 C 区的拉疏隆起形成“鼓包”的支撑力主要是来自于 C、D 相连地区的剪切弹力,因此不仅会使得 D 区上升“迟后”,而且还会使它受到强大的垂向剪切压力,因而形成了“压缩凹陷”结构<sup>[1,3]</sup>。

如图 2 所示,由于海洋边缘等地带的垂直差异下降的地区,地势较低的 F 地区的下降速率总是比地势较高的 E 地区的下降速率要大(否则就不是差异下降区)。如果 F、E 地区同样是整体性较好,则下降得慢的 E 区就会“拉着”下降得快的 F 区,使 F 区下降速率变慢。因此使 F 区相对它的左右两侧及其下方地区就会下降“迟后”,而形成了“拉疏隆起”的“鼓包”;反过来,同样的道理会使得下降得慢的 E 区的下降速率加快及 E 区的下降运动“超前”,而形成“压缩凹陷”结构<sup>[3]</sup>。

从以上的讨论可以看出,“拉疏隆起区”与“压缩凹陷区”是一个相辅相成的整体,它们既是互为存在的条件,又是互为形成的原因,并且是组成了一个由地壳岩层的剪切弹力与重力

本文为湖南省地震局研究课题(编号 96.03)资助。

本 1997 年 7 月收到,1998 年 7 月改回,王毅编辑。

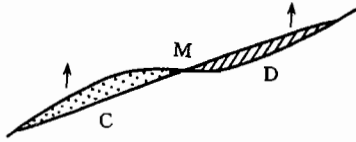


图1 大陆区差异上升形成的不稳定块体  
(孕震体)剖面示意图

Fig. 1 Profile of unstable block (seismogenic block)

shaped by differential uplift in continental area

C—C区是上升“超前”，形成拉疏隆起区；D—D区是上升“迟后”，形成压缩凹陷区

C—C area is advanced in uplift, and shape into extensional uplift area; D—D area is sluggish in uplift, and shape into compressive depression

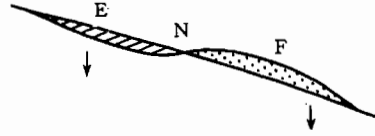


图2 海洋区差异下降形成的不稳定块体  
(孕震体)剖面示意图

Fig. 2 Profile of unstable block (seismogenic block)

shaped by differential subsidence in marine area

E—E区为下降“超前”，形成的压缩凹陷区；F—F区为下降“迟后”，形成的拉疏隆起区

E—E area is advanced in subsidence, and shape into compressive area; F—F area is sluggish in subsidence, and shape into extensional uplift area

互相抗衡的、合二为一的加强不稳定体。随着地壳与岩层大于一定速率垂直差异运动的继续，“压缩凹陷区”应变的积累会越来越强烈，相应的剪切应力也会越来越大；同时“拉疏隆起区”的隆起也会越来越高，使其“悬吊”、“撬起”也越来越厉害，相应产生与弹力相抗衡的重力作用也会越来越大。当剪切弹力不能支撑住拉疏区的继续隆起时，地壳岩层就会沿着拉疏隆起区与压缩凹陷区的连接线一带破裂而发生地震。岩层破裂后，拉疏隆起区下降，冒水冒沙；而压缩凹陷区则弹性回跳上升。

这一孕震机制几乎能解释与孕震体有关的绝大多数地震前兆与异常现象。

## 1 从滇西地区地壳形变特征探讨丽江地震前的短临预报前兆特征

### 1.1 丽江7.0级地震前滇西地区地壳形变特征

① 在1981~1985年，西北向存在着两个较为强烈的相对差异上升区：一是永胜—期纳地区，年速率为4~8 mm/a；二是永平—保山地区，年速率为4~10 mm/a。与此相对应又存在着两个相对下降区：一是丽江—剑川—洱源地区，年速率为-4~-22 mm/a；二是南涧一带，年速率为-2 mm/a。如图3所示。② 在1985~1992年(后期)，滇西地区的地壳形变几乎发生了相反的变化：丽江—剑川—洱源地区，由相对下降中心，变成了相对上升中心，速率为2~3 mm/a。特别是丽江地区先后垂直形变相差高达109 mm左右，平均速率为9.91 mm/a；南涧一带则以1 mm/a速率上升。而永胜—永平—保山一带形成NE向的相对下降条带，漾濞—永平为下沉中心，其速率1~3 mm/a。如图4所示<sup>[4]</sup>。

### 1.2 地震孕震区——“拉疏隆起-压缩凹陷区”特征

地震短临预报最关键的一环是要首先找到将要可能发生地震的孕震区，即找到“拉疏隆起-压缩凹陷区”。这样为震级与时间的短临预报就找到了可实施动态监测研究的对象与范围。那么怎样在丽江地震之前，分析滇西地区地壳形变的特征，从而能事先科学地判断孕震区是丽江而不是别的地区呢？我们从以下几个方面来分析讨论：

(1) 据1981~1985年垂直差异运动的速率大小 在丽江7.0级地震前，根据滇西地区的地壳形变资料，求得永平、保山至昌宁、弥渡地区，每年每公里垂直差异运动的平均速率只有0.075 mm/km.a，其中变化最激烈的永平地区也只有0.4 mm/km.a。并且不是单向变化，范围

也小;求得丽江—永胜地区每年每公里的垂直差异运动的平均速率是 0.75 mm/km. a。这里不仅是单向变化,实际变化范围很广。从图 3、图 4 看出,还有很大一部分变化地区在观测布网区之外。因此丽江地区地壳垂直差异运动的速率与变化的范围都远远地大于永平、保山等地区。

据笔者初步研究,发生强震危险区的应变指标一般是 0.45 mm/km. a 左右(不同地区会有所不同)<sup>[2]</sup>。丽江地区为 0.75 mm/km. a,已远大于这一指标。因此丽江地区地壳垂直差异运动速率大,其显示属于强震危险区。

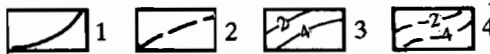
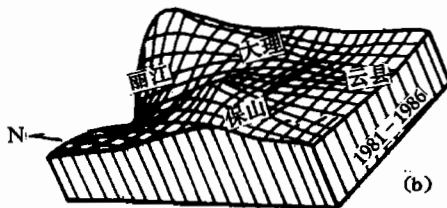
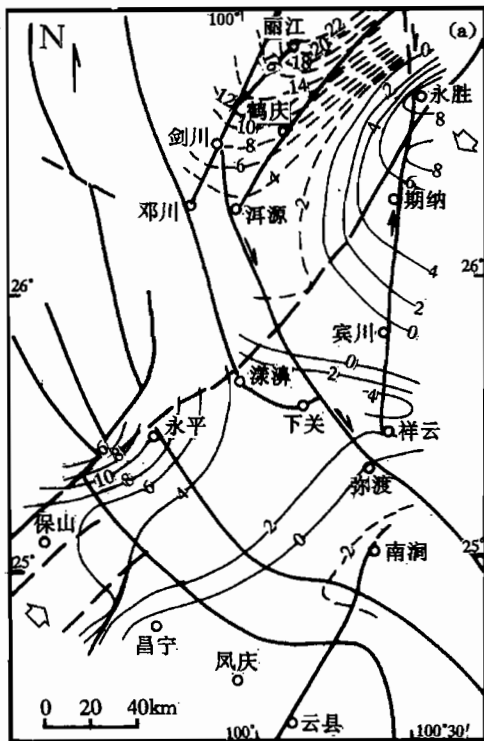


图 3 滇西地区垂直形变速度等值线平面图(a)和立体图(b)(据张兴华等<sup>[4]</sup>)

Fig. 3 (a) Planimetric map and (b) stereogram of isograms of vertical deformation rates in west Yunnan (after Zhang Xinghua et al. <sup>[4]</sup>)  
1—断裂;2—隐伏断裂;3—上升区;4—下降区  
1—Fault;2—hidden fault;3—uplift area;  
4—subsidence area

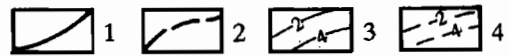
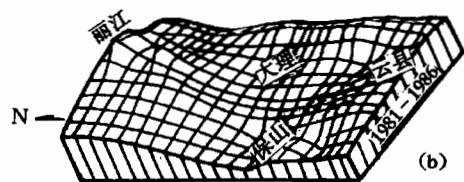
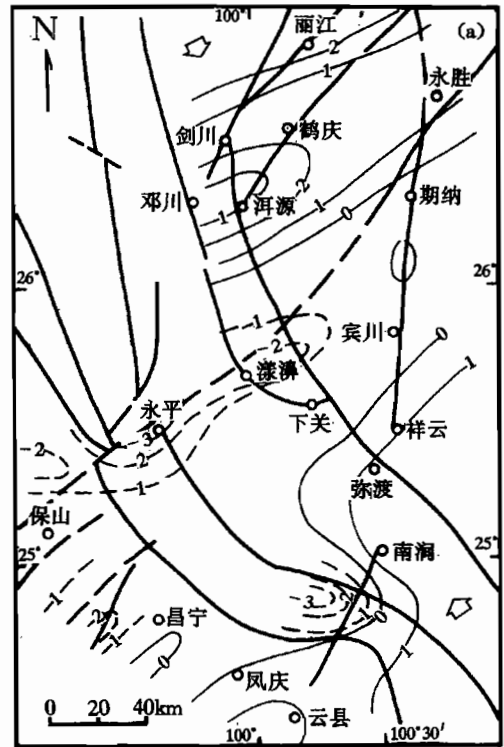


图 4 滇西地区垂直形变速度等值线平面图(a)和立体图(b)(据张兴华等<sup>[4]</sup>)

Fig. 4 (a) Planimetric map and (b) stereogram of isograms of vertical deformation rates in west Yunnan (after Zhang Xinghua et al. <sup>[4]</sup>)  
1—断裂;2—隐伏断裂;3—上升区;4—下降区  
1—Fault;2—hidden fault;3—uplift area;  
4—subsidence area

(2)据 1985~1992 年本区地壳形变变化趋势 从图 4 看出,在这段时间内滇西地区地壳形变几乎发生了相反方向的变化。丽江—剑川—洱源地区由前期的每年 $-4\sim-22$  mm/a 的下沉中心,变成了每年 $2\sim 3$  mm/a 的隆起中心,两期变化的绝对值达 $6\sim 25$  mm/a,垂直形变高差达 109 mm,年平均速率达 9.91 mm/a。并且变化的地域也大。

漾濞—永平—保山地区,同样是由前期的相对上升区,转为相对下降区,但两期速率变化的绝对值只有 $5\sim 13$  mm/a,并且总体不是单调变化,范围也小。

在地壳岩层的垂直差异运动的过程中出现了速率变慢、停滞、反向等“闭锁”变化,是判别是否是孕震体的重要标志。因为闭锁、停滞、反向等变化就是地壳块体结构的整体性在差异运动中“僵硬”的体现。孕震体能形成相对“拉疏隆起-压缩凹陷”的不稳定态势,就是岩层结构的整体性使运动“僵硬”的直接结果。

从图 3、图 4 看出,丽江由大幅度下降转为反向上升,同时永胜的上升速率也大为减慢,这就预示着 1985~1992 年丽江—永胜地区,在地壳继承性的垂直差异上升的过程中,已逐步形成了相对“拉疏”的隆起区,已是孕震体的一部分。那么与之相连的、孕震体的另一部分“压缩凹陷”的地区在哪里呢?

根据前文对地震孕育机制的讨论及以往的研究<sup>[1,3]</sup>可知,在大陆差异上升地区的孕震体,“压缩凹陷区”总是在地势高的一方(即相对上升“迟后”的相连地区),而“拉疏隆起区”总是在地势低的一方(即相对上升“超前”的地区)。由于丽江—永胜地区于 1985~1992 年为“拉疏隆起”,与之相邻的地势高的北面及西北面应为“压缩凹陷区”。据图 3 等值线的变化地域、变化趋势及变化走向,看出正好是丽江至玉龙雪山的山前地带。可惜大部分已在测网之外而没有观测到。我们将测网之外的等值线大致补充如图 5 所示。在图 5 中所补充的等值线虽然与实际不一定会完全符合,但其变化的趋势、方向、变化大小与展布的范围,在震前是能划定的。

总之,据本区的垂直差异运动的速率大小及其反向、闭锁变化值的大小以及孕震机制等特征的分析研究,认为震前是可以确定孕震体是在丽江至玉龙雪山的东面地区,而不会是永平—保山等别的地区。在丽江 7.0 级地震之前,这种发生地震的可能性是可以判断的。至于是否具有普遍的规律性<sup>[1,2]</sup>,需进一步研究探索。

### 1.3 短临预报的发震时间与震级大小的地壳形变特征

在找到了孕震体的基础上,才有可能更有效地分析研究地壳形变与发震时间及震级大小的临震判别指标。在理论与实践上都已证明,岩石在宏观破裂之前,一定会产生大量的微观裂纹,使杨氏模量降低发生应变“软化”现象<sup>[5]</sup>,因此孕震区的“拉疏隆起-压缩凹陷”形成的应变“闭锁”,不会长期“闭锁”不动,一般支撑“拉疏隆起区”的地壳岩层的剪切弹力是有限的,因此一定会有一个“解锁”加速的阶段。

丽江地震之前,由于垂直形变复测周期长,因而难以观测到临震前的“解锁”加速变形特征。针对以上地震的孕育物理机制是“拉疏隆起-压缩凹陷”的模式,笔者曾提出了用 GPS 技术建立“平面垂差速率监测法”<sup>[2]</sup>。这一方法使对孕震体的“点”或“线”的动态观测,提高到了“面”的动态观测,无疑将会大大促进对孕震体孕震过程的整体动态的全面观测理解。① 前期应变是近似线性加速的弹性应变趋势,并且其差异运动的速率比长期应变速率大数倍。② 中期应变差异运动会出“僵硬”局面,形成“拉疏隆起区”与“压缩凹陷区”相连的不稳定结构——即孕震体的形成。震中位置将在两区相连的联线附近,并且等烈度线将多偏移于“拉疏隆起区”的一侧。③ 后期是“僵局解锁”,出现“拉疏隆起区”与“压缩凹陷区”的运动趋势分离、反向、不均

匀翘起、或不均匀掀斜等不稳定加速运动,并且可能会再次出现短暂停滞(平静)、反向、不均匀运动等不稳定状态。这时即为临近发震的时间标志。④ 震级大小可根据震前观测得到的“拉疏隆起”与“压缩凹陷”区的相对差值及面积大小,以及岩层弹性应变大小进行能量估算而得到。由于震级的能量级差大,近似计算的误差相对就小了。因此计算结果与实际发震的震级误差相对也会较小。⑤ 强烈地震发生时,一般沿图1、图2“拉疏隆起区”与“压缩凹陷区”分界线的M或N线附近断裂解体:“压缩凹陷区”主要是弹性快速上升,弹性势能的一部分释放出来造成破坏,另一部分则被吸收转化为重力位能,因此破坏相对要轻;“拉疏隆起区”主要是重力及弹性快速回落,释放弹性势能及大量的重力回落势能,造成相对严重的破坏。这就是震中区的等烈度线往往会偏离于发震断层,而旁移于“拉疏隆起区”内的主要原因,不少破坏地震已显出这个规律,丽江地震也是如此<sup>[6]</sup>。实践证明,几乎是所有的强烈地震的震中区都观测到了震后分别存在上升与下降运动的两个区域,丽江地震也不例外<sup>[7~9]</sup>。但在地势坡度大的地带,由于地壳岩层具有塑性流变运动的特性,会普遍存在着水平差异运动势。因此当强烈地震发生时,断层附近往往会伴有水平剪切运动现象。但这种水平差异运动不是地震形成的主要原因,并且会随着深度的增加而不断减弱的<sup>[1,2,9]</sup>。

## 2 讨论和结论

(1)在丽江7.0级地震之前,研究滇西的地壳形变特征,得出了有强震发生,并且孕震体位于丽江至玉龙雪山东麓一带。主要依据笔者曾提出的“地壳弹性垂直差异运动的速率大小是能否孕育发生地震的关键因素”及“地震的物理孕育机制是‘拉疏隆起-压缩凹陷’机制”这两个基本的理性认识<sup>[1~3]</sup>。也就是说根据这一理性认识,只要是震前连续观测地壳垂直形变的网络系统,覆盖了未知强震的震中区,并配合其他的观测手段,一般就能发现这个震中区,即

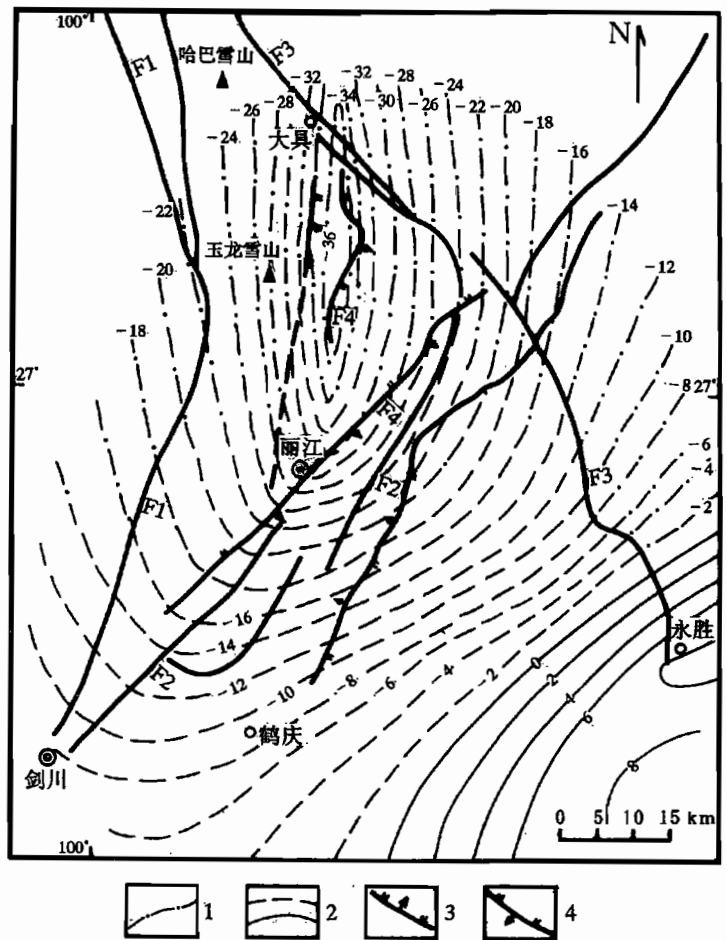


图5 丽江地区垂直形变速率等值线图(据张兴华等<sup>[4]</sup>)

Fig. 5 Isograms of vertical deformation rates in Lijiang area

(after Zhang Xinghua et al. <sup>[4]</sup>)

1—补充等值线;2—原实测等值线;3—正断层;4—逆断层

1—Complementary isograms; 2—observed isograms; 3—normal fault;

4—reverse fault

都会观测到“弹性垂直差异运动速率大”及“拉疏隆起-压缩凹陷”为主要特征的孕震体。

尽管地震前地壳的形变一般都很复杂,但有了这些基本的理性认识以后,在监测研究中,就能把握住分析的方向,也能较正确地作出判断。丽江地震之前,滇西地区所测的形变资料,虽然不够齐全,但已能作出基本的分析判断了。这是对这些理性认识印证得相当好的一例。

因此笔者认为连续监测地壳岩层垂直差异运动速率的大小,并在相对较大范围的地震危险区中,寻找到范围较小的,并具有“拉疏隆起-压缩凹陷”特征的不稳孕震体,是突破地震预报的关键。

(2)要监测强震区及强震带的地壳的垂向形变,仅仅采用水准测量的方法是很不够的,因此笔者建议将这项监测寻找孕震体及其特征的研究。列入我国“95-10”重点课题,采用当前最先进的GPS技术,按周友华<sup>[2]</sup>所提出的平面垂直差异运动速率布网监测的方法与要求,在我国选几个强震区、带,进行连续的实验监测研究,将具有重大的现实意义与科学价值。并且目前GPS观测技术的垂直精度已达到 $10^{-7}$ <sup>[11]</sup>,这对于孕震体的隆起与凹陷估计垂向变幅在数年内的累积可达几厘米到一、二十厘米(地心坐标)的变化来说,应是可以监测出来的。这样将会大大促进我国地震监测预报的科学化、现代化及快速反应:首先在范围较大的强震区带中,可以快速监测出地壳弹性垂直差异运动(不是蠕滑)大于一定数值的强烈地段,这样可以进一步确定并缩小强震危险区的范围;进而跟踪监测从中找出“拉疏隆起-压缩凹陷”特征的不稳孕震体,这样范围又可大大地缩小;结合其他观测手段进一步确定与缩小孕震体的范围及其迁移等变化;最后基本依照本文的讨论可进一步观测捕捉短临发震的时间与震级大小的形变等特征,并结合地震地质及其他多种监测手段综合研究,一定可以将地震预报研究推上一个新的发展阶段,将会大大加速地震预报的最后实现。

### 参 考 文 献

- 1 周友华. 地壳运动及地震发生根本原因的探讨. 大地形变测量, 1994, 13(1/2): 19.
- 2 周友华. 地壳形变与地震探讨. 华北地震科学, 1995, 13(4): 47.
- 3 周友华. 构造地震孕育及应力传递集中机制的研究. 见: 中国地震学会第六次学术大会论文摘要集. 北京: 地震出版社, 1996. 111.
- 4 张兴华, 宋金玲, 王琼伟, 邵德盛. 云南地壳形变与丽江7.0级地震. 地震研究, 1997, 20(1): 72.
- 5 陈颢. 地壳岩石的力学性能——理论基础与实验方法. 北京: 地震出版社, 1988. 158.
- 6 周光全, 张建国, 周瑞琦, 吴伯黔, 王桂兰. 丽江7.0级地震的地震地质构造背景分析. 地震研究, 1997, 20(1): 92.
- 7 郭增建, 马宗晋, 林伟凡, 刘庆民. 中国特大地震研究. 北京: 地震出版社, 1988.
- 8 马宗晋, 傅征祥, 张鄂珍, 江成民, 张国民, 刘德富. 1966~1976年中国九大地震. 北京: 地震出版社, 1982.
- 9 张建国, 周瑞琦, 吴伯黔, 周光全. 丽江7.0级地震地表破裂与形变特征. 地震研究, 1997, 20(1): 58.
- 10 谢觉民, Chi-Yu King. 中美断层形变研究进展及异同比较. 大地形变测量, 1994, 10(1/2): 42.
- 11 秋原幸男. GPS对大地测量学的影响. 见: GPS技术研究新进展. 天津科学技术出版社, 1996.

## Impending and Short-Term Precursory Features of Earthquakes Studied in Light of Crustal Deformation before the Earthquake of $M_s=7.0$ in Lijiang

Zhou Youhua, Tong Yingshi and Xiao Hai

(Seismologic Bureau of Hunan, Changsha, 410001)

### Abstract

This paper discusses the features and formation mechanism of seismogenic structure, i. e.

“extensional uplift and compressive depression”. Analysis of the data of crustal deformation data of western Yunnan before the  $M_s=7.0$  earthquake in Lijiang ascertains that there will be strong earthquakes in this region and even determines the exact site of the earthquakes. It is suggested that the impending and short-term earthquake precursory features of crustal deformation are various unstable changes, from “Stiff locking” of the seismogenic structure through “asynchronous acceleration”, “separation inversion”, and “uneven tilting” to “stagnation and calmness” or even to “vibration”. According to the size and amplitude of the “Compressive depression-extensional uplift” and the elastic strain of rocks observed before the earthquake, the earthquake magnitude can be approximately calculated.

**Key words:** extensional uplift; compressive depression; stiff locking; acceleration inversion; impending earthquake prediction; western Yunnan

### 作者简介

周友华,男,1939年生。1963年于长沙师专数学、物理(进修)专科毕业,1974年调入湖南省地震局工作。主要从事地壳运动、地震孕育物理机制及地震预报的研究工作。现任湖南省地震局分析预报研究中心高级工程师。通讯地址:410041,长沙市解放东路327号。

## 《地质学报》(中、英文版)、《地质论评》征稿简则

《地质学报》、《地质论评》是中国地质学会主办的地质科学学术刊物,反映地质科学各分支学科及边缘学科中最新、最高水平的基础理论研究和基本地质问题研究成果。《地质论评》主要登载新技术、新方法及各种探讨、争鸣、评述类论文。《地质学报》着重基础理论研究和基础地质成果。《地质学报》(中文版)和《地质学报》(英文版)的论文主要依论文的读者对象划分,主要读者限于国内的刊于中文版,在国际上将会有较多读者的刊于英文版。除非作者特别申明,编辑部有权根据专家和编委会意见决定稿件最终登载于《地质学报》(中文版)、《地质学报》(英文版)或《地质论评》。

1. 《地质学报》、《地质论评》编辑部与作者在投稿方面有如下约定:① 作者应保证任何稿件不得一稿两投。更应保证作者对所投稿件拥有无可争议的著作权,没有侵犯他人的著作权或剽窃他人成果。② 作者投稿时请尽量提供用计算机打印的清楚稿件,图件应复印清楚。投稿时请不要交软盘和清绘图。文稿和图件请作者自留底稿,以防原件丢失。③ 编辑部承诺一般在90日内给出刊用与否的通知。作者在90日内未收到通知时不应将稿件另投他刊,满90日后改投他刊也务请迅速通知本编辑部。④ 对决定录用的稿件,作者应根据编辑部提供的修改意见修改后,向编辑部提交载有论文全文的软盘、纸样和清绘好的图件(300线以上激光纸样亦可)。文件用何种系统排版不限,但《地质论评》和《地质学报》(中文版)的稿件以方正(或华光)系统为好,因为最终出版是用方正系统。若非方正(或华光)系统,请在原系统文件之外再拷贝一份纯文本文件。《地质学报》(英文版)则以WORD排版为好。⑤ 稿件文责自负,若进行实质性修改,须征得作者同意。⑥ 稿件刊出后,将按规定支付稿酬。

2. 《地质学报》中文版的征稿简则与1995年第2期《地质学报》刊登的征稿简则基本相同。变化是一般论文均不再全文照译刊于英文版,但将在同卷、期的英文版上登载该文的英文摘要(600~1000汉字)。所以摘要应写成报道式,交代清楚论文的目的、方法、主要证据、结果和结论等。

3. 《地质学报》英文版:① 征集6页以下的短文和6~12页的长篇论文。② 凡是投向《地质学报》(英文版)的稿件,请尽量附相应的中文稿,以备审、编、校时准确理解原文含意。最好中、英文稿各两份。也可先仅投中文稿(但其写作方式按英文稿),待审稿录用后再译为英文。③ 凡是英文版上刊登的论文,请附600~1000字的中文摘要,以备同卷、期中中文版刊登(要求用“报道性文摘”书写,包括目的、方法、主要证据、结果和结论等)。④ 图件用英文标注,但需附中文标注的草图,以备审、校。

4. 参考文献的列出格式请参看近两年的《地质论评》和《地质学报》(中、英文版),请特别注意,本编辑部要求将论文的所有作者一一列出。